

Afinidad magmática de lavas de la formación atotonilco el grande Magmatic affinity of lavas of the atotonilco el grande formation

L. E. Ortiz-Hernández ^a, J. C. Escamilla-Casas ^{a,*}

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Se consigna la afinidad magmática de lavas formadoras de estructuras volcánicas (tubo de explosión y bola de lava acrecional), que ocurren hacia la cima de la formación Atotonilco El Grande (Plioceno), en las inmediaciones del poblado homónimo y el balneario de Amajac, en la parte central del estado de Hidalgo (México central). La petrografía muestra una textura microlítica porfídica con matriz hialofítica para el derrame del tubo de explosión y traquítica para la bola de lava acrecional, siendo el mineral accesorio augita. La geoquímica basada en análisis de elementos mayores y traza de las lavas, señala la existencia de contenidos en sílice de 47.95-60.98% correspondiendo a basalto y traquiandesita metaluminosos ($0.69 \leq A/CNK \leq 0.89$), con espectros enriquecidos en tierras raras ligeras ($5.91 \leq (La/Yb)N \leq 7.82$) y con cierta afinidad con basaltos de islas oceánicas. Estas lavas se correlacionan con la evolución pliocénica del sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, siendo extravasadas en un ambiente continental (paleolago).

Palabras Clave: Afinidad magmática, tubo de explosión, bola de lava acrecional, Atotonilco el Grande, estado de Hidalgo.

Abstract

It is recorded the magmatic affinity of volcanic structure-forming lavas (explosion pipes and accretion lava balls) from the upper part of the Pliocene Atotonilco El Grande formation, nearby the namesake town and the Amajac spa, central Hidalgo state (central Mexico). For the spill of the explosion pipe petrography shows a microlithic porphyry texture with halophytic matrix and trachytic for the accretional lava ball, being augite the accessory mineral. Major and trace element geochemical analysis in lava spill, point to the existence of silica contents of 47.95-60.98% corresponding to metaluminous basalt and trachyandesite ($0.69 \leq A/CNK \leq 0.89$), with enriched LREE spectra ($5.91 \leq (La/Yb) N \leq 7.82$) and certain affinity with oceanic island basalts. These lavas are correlated with the Pliocene evolution of the eastern sector of the Trans Mexican Volcanic Belt, poured in a continental environment (paleo lake).

Keywords: Magmatic affinity, explosion pipe, accretion lava ball, Atotonilco El Grande, state of Hidalgo.

1. Introducción

La Formación Atotonilco el Grande aflora en varias partes del territorio hidalguense (Segerstrom, 1961) y particularmente en las inmediaciones del poblado homónimo y en los alrededores del balneario de Amajac, en el estado de Hidalgo (México central). Es una sucesión sedimentaria-volcánica de cerca de 550 m de espesor (Velasco-de León, *et al.*, 2000), de edad Plioceno (Arellano-Gil *et al.*, 2005), en la cual los primeros 350 m basales corresponden a una secuencia clástica lacustre, con influencia volcánica, en tanto que los 200 m restantes, de la cima, consiste en coladas de lava (Velasco-de León *et al.*, 2000). Estos últimos son derrames de lava fisurales que forman mesetas, en las cuáles es común encontrar

estructuras volcánicas como disyunción columnar, tubos de explosión y grandes bolas de lava acrecionales (Ortiz Hernández *et al.*, 2014, 2018).

El presente trabajo consigna la afinidad magmática de estructuras volcánicas (tubos de explosión y bolas de lava acrecionales), mediante la petrografía y geoquímica de elementos mayores y traza de las lavas que conforman dichas estructuras, para situarlos en el contexto de la evolución de este sector de la Faja Volcánica Trasmexicana.

*Autor para la correspondencia: jocesca@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: leoh@uaeh.edu.mx (Luis Enrique Ortiz-Hernández), jocesca@uaeh.edu.mx (José Cruz Escamilla-Casas).

Historial del manuscrito: recibido el 09/01/2024, última versión-revisada recibida el 27/03/2024, aceptado el 02/04/2024, en línea (postprint) desde el 05/04/2024, publicado el DD/MM/AAAA. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i24.12309>



2. Parte experimental

Se obtuvieron análisis de roca total de dos ejemplares seleccionados, uno correspondiente al tubo de explosión (muestra SMH-1) y el otro al de la bola de lava acrecional (muestra APIH-1), los cuáles se analizaron mediante fluorescencia de rayos X, utilizando un espectrómetro Philips MagiXPRO del Laboratorio Ambiental Copper State de México., S.A. de C.V. Las muestras fueron pulverizadas a la malla -200 y analizadas de acuerdo con estándares analíticos rigurosos, obteniéndose los valores en % en peso, con una precisión analítica mayor o igual al 95%. Los elementos en traza se obtuvieron en ppm, mediante ICP-MS (VGEelemental modelo PalmaQuad3), también en el Laboratorio Ambiental Copper State de México., S.A. de C.V.

Las láminas delgadas de los ejemplares estudiados, de 30

determinado mediante difracción de rayos X, como una combinación de hidromica y montmorillonita.

Estas lavas se presentan hacia la cima de una secuencia piroclástica formada de la base a la cima de un aglomerado volcánico riolítico de 10 m de espesor, el cual es sobreyacido por una toba de composición riolítica de espesor variable de 2.0 a 2.5 metros. Esta secuencia piroclástica es sobreyacida por el basalto estudiado, con espesor de 2.0 a 2.5 m, presentando una estructura columnar característica, por lo que corresponde al frente de un derrame, donde se formó el tubo de explosión estudiado (Figura 1b).

Desde el punto de vista petrográfico la lava de Amajac presenta una textura microlítica porfídica con matriz hialofítica formada de microfenocristales subhedrales a euhedrales de plagioclasa cálcica (labradorita), en ocasiones con zonación característica (labradorita-andesina), incluidos en una

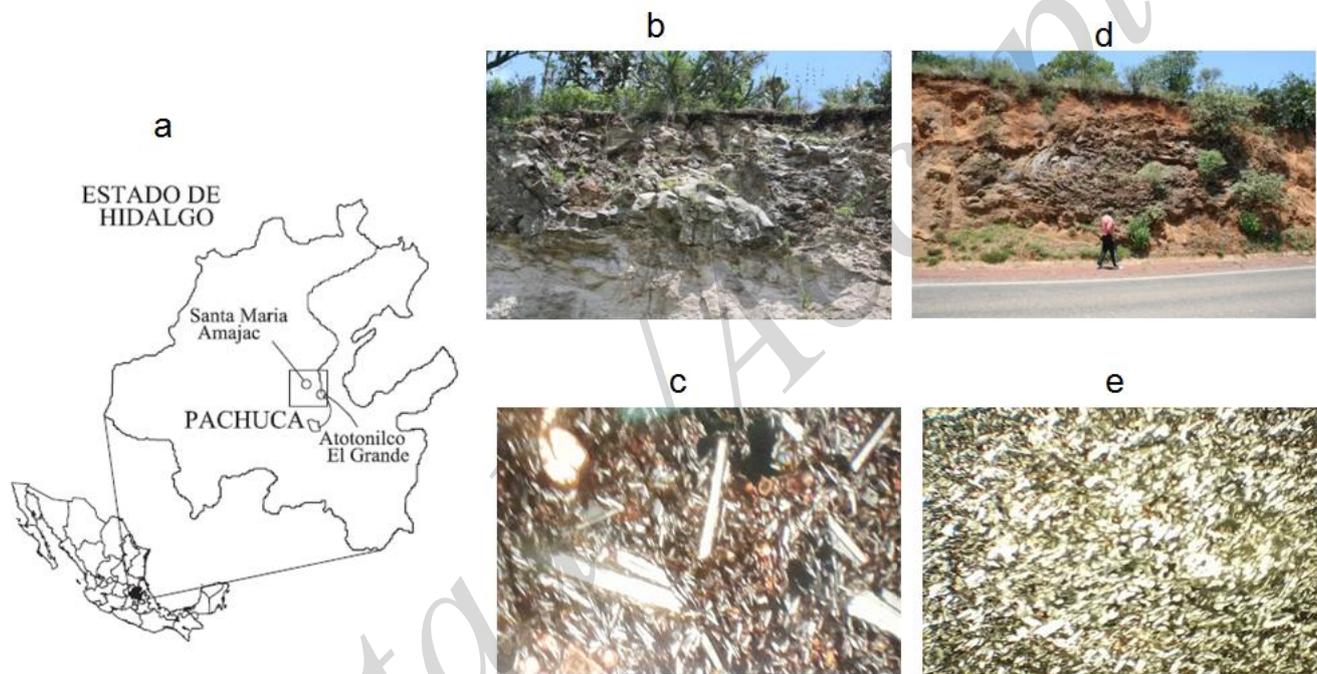


Figura 1. a): Localización de las estructuras volcánicas caracterizadas en el estado de Hidalgo. b): Afloramiento de tubo de explosión en derrame de lava sobreyaciendo a rocas piroclásticas en Amajac. c): Fotomicrografía de lámina delgada correspondiente mostrando rasgos texturales y mineralógicos. d): Afloramiento de bola de lava acrecional en el libramiento Huejutla-Pachuca próximo al acceso a Atotonilco El Grande y e): Fotomicrografía de la lámina delgada mostrando microlitos birrefringentes orientados paralelamente constituyendo una textura traquítica.

micras de espesor, fueron elaboradas en el Servicio Geológico Mexicano y estudiadas en el Laboratorio de Microscopía Óptica de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, dónde se obtuvieron asimismo las respectivas fotomicrografías con nícoles cruzados y amplificación 10x.

3. Petrografía y relaciones de campo

En el afloramiento de Amajac, situado a 5 km al noroeste del poblado de Atotonilco El Grande (Figura 1a), las lavas son vesiculares, de color gris oscuro, con color de intemperismo ocre y textura microlítica. En ocasiones estas lavas son amigdaloides ya que sus vesículas, que varían de 1 cm hasta 3 cm de longitud, están rellenas por un agregado blanquizco

mesostasis constituida de microlitos de plagioclasa de similar composición en cuyos intersticios se observa vidrio volcánico con abundantes inclusiones de minerales opacos (ilmenita). Diseminados en esta mesostasis ocurren fenocristales subhedrales de clinopiroxeno (augita), con inclusiones de minerales opacos (óxidos de hierro) reemplazados en sus bordes y a través de fracturas por hidróxidos de hierro e hidromica. La roca se clasifica como un basalto microlítico porfídico de augita (Figura 1c).

En lo que respecta al afloramiento de bola de lava acrecional, el afloramiento se localiza en el libramiento Huejutla-Pachuca próximo al acceso del poblado de Atotonilco el Grande. Está compuesto principalmente de grandes estructuras esferoides u ovoides de 4-10 m de diámetro, con fracturamiento esferoidal concéntrico y abundantes vesículas

(1-3 cm de diámetro), embebidas en un material tobáceo muy argilizado o con oxidación perteneciente a una oleada piroclástica basal (Figura 1d).

Petrográficamente la roca exhibe una textura traquítica consistente en un intercrecimiento de microlitos birrefringentes de plagioclasa (labradorita-andesina) y escaso feldespatos potásico (sanidino), que se disponen paralela o subparalelamente, y que están englobados por una mesostasis vítrea de composición intermedia que contiene abundantes minerales opacos. El accesorio es el clinopiroxeno (augita), que se presenta en microfenocristales subhedrales diseminados con un porcentaje menor al 7%. Se clasifica como traquibasalto de augita (Figura 1e).

($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}>7\%$). El contenido en Fe_2O_3 es alto en ambas rocas, lo que se traduce en la norma CIPW como abundante ilmenita y magnetita. La norma CIPW señala que la lava del tubo de explosión de Amajac tiene nefelina (1.3%), diópsido (13.07%) y olivino (17.18%) normativos, en tanto que la lava de la bola acrecional (APIH-1) no tiene nefelina, pero sí cuarzo (10.16%) e hiperstena normativos (14.49%). Esto concuerda con las observaciones de Robin (1976a) para la serie volcánica Atotonilco El Grande, cuya coincidencia se muestra en los diagramas $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2 , $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})$ vs $\text{Al}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ y $\text{FeO}^*-\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}$ (Figuras 2a, 2c y 2d). No obstante, la traquiandesita de Atotonilco no sigue el comportamiento geoquímico del basalto de Amajac, ya que se separa en los

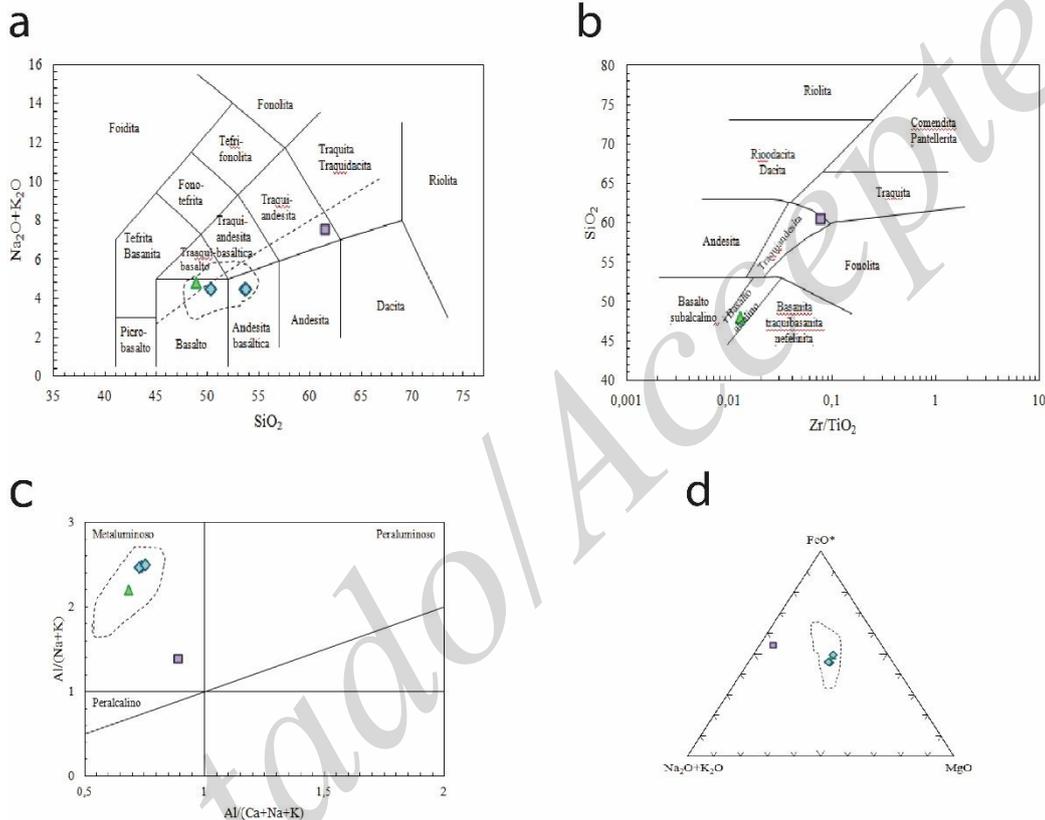


Figura 2. a): Diagrama $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2 (LeBas et al., 1986), b): Diagrama SiO_2 vs Zr/TiO_2 (Winchester y Floyd, 1977), c): Diagrama $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})$ vs $\text{Al}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ y d): Diagrama $\text{FeO}^*-\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}$ que muestran la clasificación, el carácter metaluminoso y comportamiento de elementos mayores de las lavas analizadas. Triángulo verde corresponde a la lava de Amajac, el cuadrado gris a la lava de Atotonilco el Grande, y el rombo verde a muestras de Atotonilco de Orozco-Esquível et al. (2007). El área punteada en las figuras 2a, 2c y 2d corresponde a la serie Atotonilco el Grande de Robin (1976a).

4. Geoquímica y afinidad magmática

La composición química de las lavas analizadas muestra que se trata de basalto y traquiandesita ($47.95\% \leq \text{SiO}_2 \leq 60.48\%$; Tabla 1), según los diagramas de discriminación $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2 (LeBas et al., 1986; Figura 2a) y SiO_2 vs Zr/TiO_2 de Winchester y Floyd, 1977; Figura 2b). Son rocas metaluminosas ($0.69 \leq \text{A}/\text{CNK} \leq 0.89$); Figura 2c), con contenido en TiO_2 variando de 1.10% en la traquiandesita a 2.10% en el basalto (Tabla 1). Los valores en álcalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=4.70\%$) y titanio ($>2\%$ en peso) del basalto son altos, lo que podría indicar que se trata de basalto alcalino (SMH-1), al igual que el de la traquiandesita

diagramas utilizados. La lava de Amajac parece ser un basalto de islas oceánicas (OIB), como lo demuestran sus cocientes Zr/Nb , Ba/Rb , Ba/La , La/Y y K/Ba (16.32, 26.72, 11.99, 0.73 y 25.46, respectivamente), que son típicos de OIB (Verma y Nelson, 1989); para el caso de la bola de lava acrecional sólo los cocientes K/Rb , K/Ba , Ba/Rb y Ba/La están en el rango de OIB (489.47, 29.81, 16.42 y 14.65, respectivamente).

La bola de lava acrecional tiene cociente $\text{K}/\text{U}=14684$, próximo al valor de MORB de tipo enriquecido (15700 ± 3100 ; Arevalo Jr. et al., 2009). y está en el rango de MORB (Farcy et al., 2020).

En el diagrama triangular $\text{TiO}_2-\text{MnO} \times 10-\text{P}_2\text{O}_5 \times 10$ de Mullen (1983) el basalto se sitúa en el campo de basaltos alcalinos de islas oceánicas (Figura 3a). En el diagrama

Ti/1000 vs V de Shervais (1982) cae en el campo de lavas de rift o de isla oceánica (Figura 3b). Similar resultado sucede en el diagrama Ti/1000 vs V de Vasconcelos et al. (2001) (no mostrado) cae en el campo de las lavas de rift o de isla oceánica (Rt-IO). No obstante, en un diagrama de discriminación basado en los contenidos de Nb-Ba (Vasconcelos et al., 1998; Figura 3c). ambas lavas caen en el campo de arco continental, arco de islas (Figura 3c) y en un diagrama log (Ba/Nb) vs log (Nd/Ho), la traquiandesita se sitúa en el campo de andesitas relacionadas a plumas.

A nivel de las tierras raras se tiene patrones normalizados con respecto a condritas (Sun y McDonough, 1989), enriquecidos en tierras raras ligeras ($5.91 \leq (La/Yb)_N \leq 7.82$), son patrones paralelos, siendo la traquiandesita la que muestra más enriquecimiento (Figura 3a). Se constata una cierta

Ba) y ausencia de anomalías para elementos de campo electrostático fuerte (Nb, Ta, Zr, Y), Figura 4b.

Esto es concordante con los resultados de Orozco-Esquivel et al., (2007), quienes mencionan que el sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana posee una variabilidad geoquímica tal que la firma calcoalcalina típica de subducción cambió después del Mioceno tardío a volcanismo máfico alcalino de tipo islas oceánicas.

5. Conclusiones

Según Robin (1976a), Robin (1976b) y Cantagrel y Robin (1979), para el Mioceno-Cuaternario existe una serie calcoalcalina con basaltos andesíticos y andesitas en el sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana y otra serie

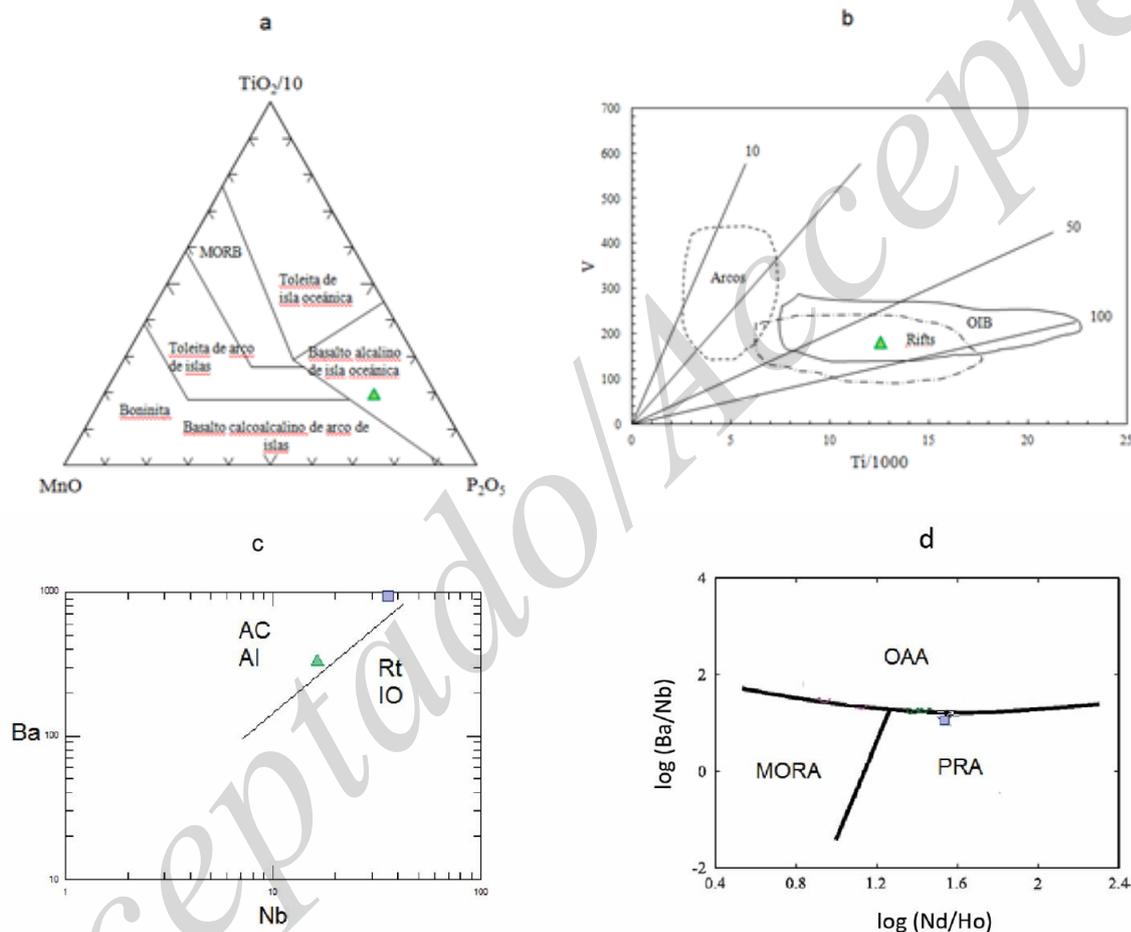


Figura 3. a): Diagrama triangular $TiO_2-MnO \times 10-P_2O_5 \times 10$ de Mullen (1983) mostrando la afinidad del basalto de Amajac con basaltos alcalinos de islas oceánicas, b): Diagrama Ti/1000 vs V de Shervais (1982) con los campos superpuestos de arcos, rifts e OIB (Verma, 2000), c): Diagrama Nb vs Ba (Vasconcelos et al., 1998) de ambas lavas y d): Diagrama log (Ba/Nb) vs log (Nd/Ho) (Liu et al., 2022) de la traquiandesita. AC=arco continental, AI= arco de islas, Rt=Rift, IO=islas oceánicas, OAA= andesita de arco oceánico, MORA= andesita de cresta oceánica, PRA= andesita relacionada a pluma.

similitud de estas lavas con la del patrón de tierras raras de basaltos de islas oceánicas (Sun y McDonough, 1989; Figura 4a). Por otra parte, los diagramas multielementos normalizados con respecto a manto primitivo (Sun y McDonough, 1989; Figura 4b) exhiben enriquecimiento en elementos altamente incompatibles de gran radio iónico (litófilos como K, Rb, Sr y

alcalina con basaltos-basanitas en el Golfo de México. No obstante, para el sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, Ferrari et al. (2005) y Orozco-Esquivel et al. (2007) reconocen tres diferentes episodios volcánicos:

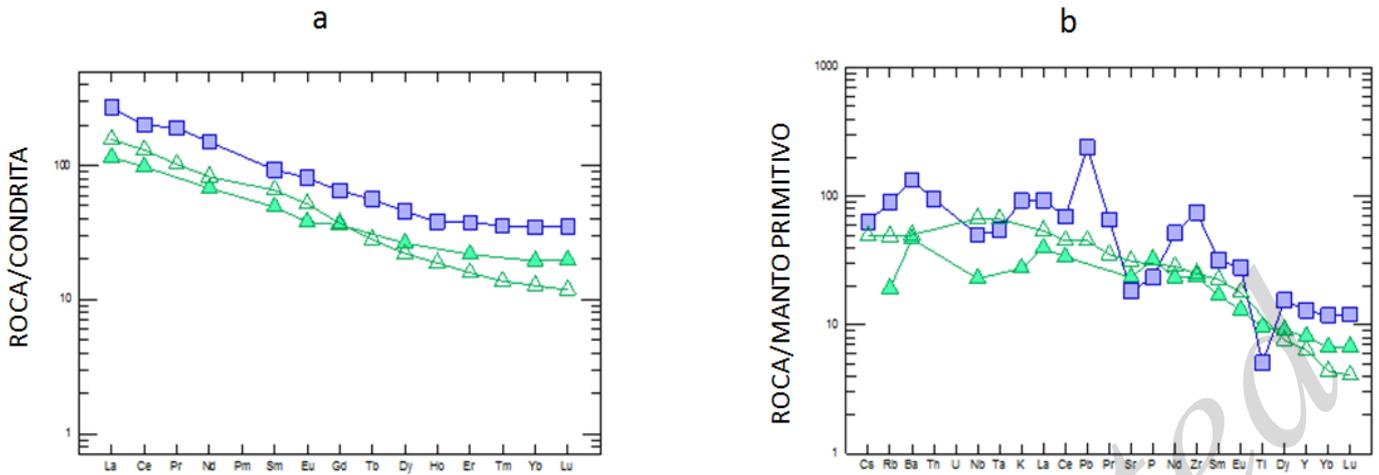


Figura 4- a): Patrones de tierras raras normalizados con respecto a condritas de las lavas y comparación con basalto de islas oceánicas (Sun y McDonough, 1989) (triángulo vacío) y b): Diagrama multielementos normalizado con respecto a manto primitivo (Sun y McDonough, 1989) mostrando enriquecimiento en elementos litófilos.

Mioceno tardío-Plioceno (7.6-3.2Ma), Plioceno tardío (~2.5-1.9 Ma) y Cuaternario (<1.2 Ma). Los derrames de lava de Atotonilco El Grande se correlacionan con los del segundo evento volcánico (~2.5 Ma; Cantagrel y Robin, 1979). Según Cantagrel y Robin (1979), andesitas basálticas de la formación Atotonilco El Grande son transicionales entre calcoalcalinas y alcalinas y arrojan edades radiométricas K/Ar de 2.38 ± 0.08 Ma a 2.56 ± 0.08 Ma.

De acuerdo con Orozco-Esquivel et al. (2007), el sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana posee una variabilidad geoquímica tal que la firma calcoalcalina típica de subducción cambió después del Mioceno tardío a volcanismo máfico alcalino de tipo islas oceánicas (OIB). Esto concuerda con el resultado presente, dado que el derrame de basalto y la traquiandesita parecen tener firma geoquímica de tipo OIB. Esto podría sugerir una fuente mantélica heterogénea, como ocurre a lo largo de la Faja Volcánica Transmexicana (Márquez et al., 1999; Ferrari, 2004).

Agradecimientos

Esta contribución forma parte de los resultados de los proyectos de investigación: *Caracterización de algunas secuencias basálticas del estado de Hidalgo* y *Caracterización estructural y petrológica de intrusiones máficas en la región oriental de la Sierra de Pachuca*.

Tabla 1: Análisis químicos de roca total (en % en peso), norma CIPW y contenidos en elementos traza (en ppm) de las muestras analizadas.

Óxidos	SMH-1	APIH-1	Elementos traza	SMH-1	APIH-1
SiO ₂	47.95	60.48	Rb	12.2	57
TiO ₂	2.1	1.1	Sr	494.0	389
Al ₂ O ₃	15.93	14.68	Ba	326.0	936
Fe ₂ O ₃	10.97	9.9	Th	-	8.08
MnO	0.16	0.17	U	-	1.9
MgO	6.7	0.95	Zr	266.0	837
CaO	8.78	3.2	Hf	-	8.4
Na ₂ O	3.87	4.62	Ta	-	2.22
K ₂ O	0.83	2.79	Y	37.0	59.2
P ₂ O ₅	0.7	0.51	Nb	16.3	35.8
PXC	1	1.24	Sc	25.0	18
Total	98.99	98.28	Cr	196.0	19
q	-	10.16	Ni	67.0	19
an	23.89	10.83	Co	-	7
ab	30.94	39.52	V	179.0	9
or	5.25	17.46	Sc	25.0	18
ne	1.3	-	La	27.2	63.9
di	13.07	1.72	Ce	59.9	123
hi	-	14.49	Nd	31.6	69.9
ol	17.18	-	Sm	7.5	14.2
il	4.06	2.11	Eu	2.2	4.88
mt	2.52	2.28	Gd	7.4	13.3
ap	1.65	1.3	Dy	6.7	11.5
zr	0.06	0.16	Er	3.6	6.22
cr	0.04	-	Yb	3.3	5.86
TOTAL	99.96	99.93	Lu	0.5	0.89

Referencias

- Arellano-Gil, J., Velasco-de León, P., Silva-Pineda, A., Salvador-Flores, R., Beltrán-Romero, F. (2005). Origen y características geológicas del paleo-lago de Amajac, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22, 199–211.
- Arevalo Jr., R., McDonough, W. F., Luong, M. (2009). The K/U ratio of the silicate Earth: Insights into mantle composition, structure and thermal evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(3–4), 361–369.
- Cantagrel J.M., Robin, C. (1979). K-Ar dating on eastern Mexican volcanic rocks-relations between andesitic and the alkaline provinces. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 5, 99–114.
- Farcy B., Arevalo Jr. R., McDonough W.F. (2020). K/U of the MORB source and silicate Earth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2020JB020245. doi.org/10.1029/2020JB020245.
- Ferrari, L. (2004). Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico. *Geology*, 32, 77–80.
- Ferrari L., Tagami T., Eguchi M., Orozco-Esquivel M.T., Petrone C.M., Jacobo-Albarrán J., López-Martínez, M. (2005). Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: the Eastern Alkaline Province revised. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 146 (4), 284–306.
- LeBas, M.J., Lemaître, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on total alkali silica diagram. *Journal of Petrology* 27(3): 745–750.
- Liu, X, Zhang, Q., Zhang, Ch. (2022). Identification of the original tectonic setting for oceanic andesite using discrimination diagrams: An approach based on global geochemical data synthesis. *Journal of Earth Sciences*, 33(3), 696–705. doi.org/10.1007/s12583-021-1507-y.
- Márquez, A., Oyarzun, R., Doblás, M., Verma, S.P. (1999). Alkalic (OIB type) and calc-alkalic volcanism in the Mexican volcanic belt: a case of plume-related magmatism and propagating rift at an active margin? *Geology*, 27, 51–54.
- Mullen, E.D. (1983). MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 62, 53–62.
- Orozco-Esquivel, T., Petrone Ch.M., Ferrari, L., Tagami, T., Manetti, P. (2007). Geochemical and isotopic variability in lavas from the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: slab detachment in a subduction zone with varying dip. *Lithos*, 93, 149–174.
- Ortiz-Hernández, L.E., Escamilla-Casas, J.C., Blanco-Piñón, A., Cruz-Chávez, E., Ambrocio-Cruz, P., (2014). Estructuras volcánicas lacustres en Amajac, estado de Hidalgo (México central) Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales, 1, 1, 82–87. ISSN: 2395-8405. DOI: https://doi.org/10.29057/aactm.v1i1.9939.
- Ortiz-Hernández, L.E., Escamilla-Casas, J.C., Cruz-Chávez, E., (2018). Bolas de lava acrecionales en la formación Atotonilco el Grande, Estado de Hidalgo, México Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales, 5, 5, 77–82. ISSN: 2395-8405. DOI: https://doi.org/10.29057/aactm.v5i5.9117
- Pearce, J.A. (1982). Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. En Thorpe, R.S. (ed.) *Andesites*. Jhon Wiley, Chichester, 525–548.
- Robin, C. (1976a). Las series volcánicas de la Sierra Madre Oriental (basaltos e ignimbritas). Descripción y caracteres químicos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2, 13–42.
- Robin, C. (1976b). Présence simultée de magmatismes de significations tectoniques opposées dans l'Est du Mexique. *Bulletin de la Societé Géologique de France*, XVIII (6), 1637–1645.
- Segerstrom, K. (1961). Geología del suroeste del estado de Hidalgo y del noreste del estado de México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 13(3–4), 147–168.
- Shervais, J.W. (1982). Ti-V plots and petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59, 108–118.
- Sun, S. S, McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes, in Saunders A.D., Norry, M.J (eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society Special Publication, 42, 313–345.
- Winchester, J.A., Floyd, P.A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325–343.
- Vasoncelos, F.M., Verma, S.P., Rodríguez, G.J. F. (1998). Discriminación tectónica: nuevo diagrama Nb-Ba para arcos continentales, arcos insulares, "rifts" e islas oceánicas en rocas máficas. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 21, 129–146.
- Vasoncelos, F.M., Verma, S.P., Vargas, B.C. (2001). Diagrama Ti-V: una nueva propuesta de discriminación para magmas básicos en cinco ambientes tectónicos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18 (2), 162–174.
- Velasco-de León, M.P., Arellano-Gil, J., Silva-Pineda, A., Luna-Gómez, P., Romero-Beltrán, F. (2000). La secuencia lacustre y su biota de la formación Atotonilco El Grande de Santa María Amajac en el estado de Hidalgo. *GEOS Unión Geofísica Mexicana resúmenes* 20, 3, 302–303.
- Verma, S. P., Nelson, S.A. (1989). Isotopic and trace element constraints on the origin and evolution of alkaline and calc-alkaline magmas in the northwestern Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geophysical Research*, 94 (84), 4531–4544. doi.org/10.1029/JB094iB04p04531.
- Verma, S. P. (2000). Geochemistry of the subducting Cocos plate and the origin of subduction unrelated mafic volcanism at the volcanic front of the central Mexican Volcanic Belt. In: Delgado-Granados H, Aguirre-Díaz G, Stock JM (eds) *Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico*. Geological Society of America Special paper 334, 195–222. doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.195.